



In der optischen Messtechnik liefern telezentrische Objektive – im Gegensatz zu Festbrennweiten-Objektiven – auch bei variierendem Abstand zum Objekt korrekte Messergebnisse.

## Die Perspektive entscheidet

Um zu entscheiden, welche Vorteile sie gegenüber Objektiven mit Festbrennweite besitzen, gilt es, das Konzept telezentrischer Objektive zu verstehen.

Boris Lange

Dieser Artikel stellt die Eigenheiten telezentrischer Objektive vor und erklärt, warum sie in der optischen Messtechnik vorwiegend zum Einsatz kommen.

Ähnlich zum menschlichen Sehen haben Festbrennweiten-Objektive (auch entozentrische Objektive genannt) einen Öffnungswinkel, sodass weiter entfernte Objekte kleiner abgebildet werden und umgekehrt. In einem Messaufbau ist diese Eigenschaft unerwünscht: Das Messergebnis, etwa der Durchmesser eines Bauteils, soll sich nicht ändern, falls der Prüfling sich in einem anderen Abstand zum Prüfsystem befindet. Im Optikkjargon ist die Rede von Par-

allaxe oder perspektivischem Fehler: der Grad der Vergrößerung abhängig vom Arbeitsabstand.

Telezentrische Objektive eliminieren diese unerwünschte Eigenschaft oder reduzieren sie zumindest stark. Befinden sich zwei identische Objekte in unterschiedlichem Abstand zum Messaufbau, offenbart sich der Unterschied zwischen beiden Objektiven (**Abb. 1**): Trotz der verschiedenen Abstände der Objekte stellt sie das telezentrische Objektiv gleich groß dar. Beim Festbrennweiten-Objektiv scheint das nähere Objekt größer zu sein als das weiter entfernte.

Telezentrische Objektive bewerkstelligen diese Unabhängigkeit

vom Arbeitsabstand dadurch, dass der Hauptstrahl parallel zur optischen Achse verläuft. Das ist die definierende Eigenschaft eines objektseitig telezentrischen Objektivs. Dadurch muss jedoch zumindest die erste Optik im Durchmesser mindestens so groß sein wie das zu inspizierende Werkstück selbst.

### Die Tiefenschärfe

Häufig findet sich die falsche Annahme, dass telezentrische Objektive über eine größere Tiefenschärfe verfügen als Festbrennweiten-Objektive. Letztlich entscheidet jedoch die F-Zahl eines Objektivs über die Tiefenschärfe, die Telezentrie hat

nur indirekt damit zu tun. Die F-Zahl ist unter anderem für den Durchmesser des Objektivs entscheidend. Dieser ist bei telezentrischen Optiken groß im Vergleich zu einem Festbrennweiten-Objektiv, bei ansonsten gleichen Parametern. Daher fangen telezentrische Objektive erst mit F-Zahlen ab etwa F/6 an. Das reduziert den Durchmesser, die Designkomplexität sowie die Kosten des Objektivs. Festbrennweiten-Objektive lassen sich oft bis zu F/1.4 öffnen – für telezentrische Objektive ist das effizient nicht zu erreichen.

Beim Vergleich der F-Zahlen von telezentrischen und entozentrischen Objektiven kommen leicht zwei Größen durcheinander. Für Festbrennweiten-Objektive bezeichnet der häufig auf die Objektive gravierte Wert die bildseitige F-Zahl für unendlichen Arbeitsabstand. Die Wahl macht Sinn, weil Festbrennweiten-Objektive über eine ganze Bandbreite von Arbeitsabständen einsetzbar sind. Daher gibt es keinen „universalen“ Arbeitsabstand, der für alle Objektive unabhängig von Brennweite oder Hersteller gleich ist. Für telezentrische Optiken ist der Arbeitsabstand jedoch endlich und fest vorgegeben. Entsprechend dient die Working F-Number der Vergleichbarkeit. Sie berechnet sich aus der theoretischen, auf unendlich basierenden F-Zahl gewichtet

mit einem Faktor abhängig von der konkreten Vergrößerung des jeweiligen Objektivs. Für einen korrekten Vergleich mit der F-Zahl eines Festbrennweiten-Objektivs muss der an diesem Objektiv eingravierte Wert mit dem gleichen Faktor umgerechnet werden.

### Weitere Eigenschaften

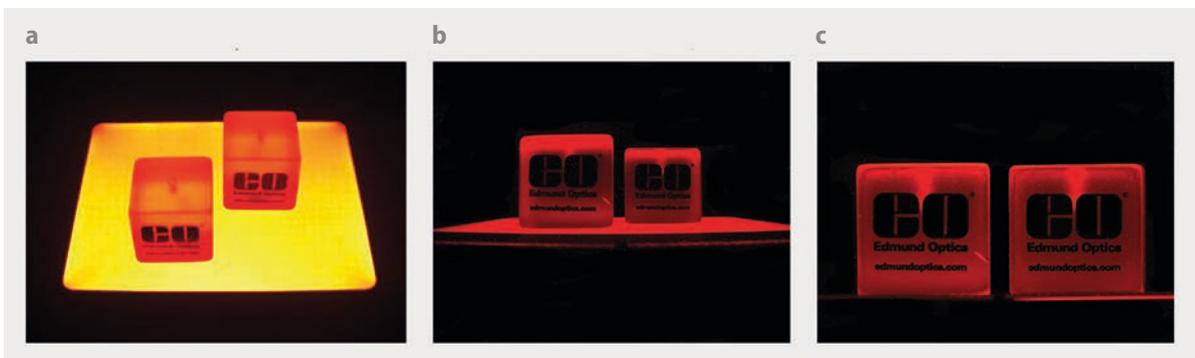
In manchen Anwendungen bieten telezentrische Objektive weitere Vorteile gegenüber einer entozentrischen Optik. Die mangelnde Perspektive macht Objekte gleichmäßig unscharf an den Grenzen der Tiefenschärfe bzw. darüber hinaus. Eine telezentrische Optik macht einen einfachen Punkt jenseits des Schärfebereichs symmetrisch unscharf (**Abb. 2**). Ein Algorithmus kann daher weiterhin die korrekte Position des Schwerpunkts feststellen. Festbrennweiten-Objektive verzerren den Punkt je nach Lage im Bild asymmetrisch zu einer Ellipse, die genaue Lage ist nicht mehr zu ermitteln. Insofern lässt sich in speziellen Situationen der nominale Tiefenschärfebereich sogar noch etwas erweitern, ohne dass zwangsläufig die Qualität der Messergebnisse leidet. Je nach Anwendung und Algorithmus kann eine gewisse Unschärfe sogar von Vorteil sein. Wenn sich der Übergang einer Kante auf mehrere Pixel verteilt statt im Extremfall nur auf

zwei, liefert ein Messsystem eventuell wiederholbarere Ergebnisse.

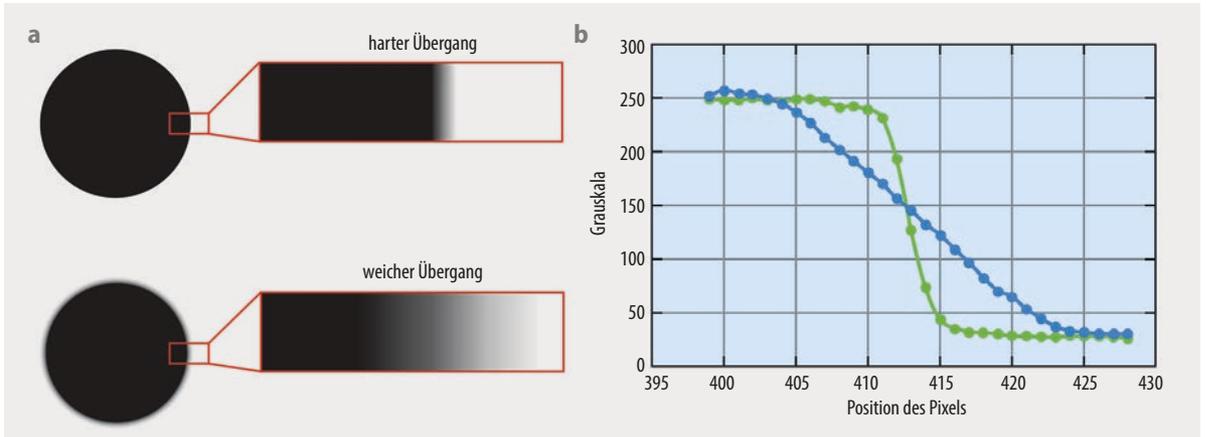
### Quantitative Beschreibung

Die Datenblätter enthalten unter dem Stichwort „Telecentricity“ die Angabe eines Winkels, meist in Verbindung mit einer Wellenlänge. Dieser Winkel beschreibt den verbleibenden Winkel des objektseitigen Hauptstrahls. Da das Optimum  $0^\circ$  beträgt, handelt es sich meist um sehr kleine Winkel kleiner  $0,1^\circ$ . Exakt  $0^\circ$  wird in der Regel nicht erreicht: Der Winkel hängt von der Wellenlänge des Lichts ab, aber die meisten Objektive sind für einen ganzen Wellenlängenbereich ausgelegt. Es gilt also, einen Kompromiss zu finden zwischen dem verbleibenden Winkel und dem gewünschten Wellenlängenbereich für den Einsatz des Objektivs.

Betrachtet man für ein telezentrisches IX Objektiv den Winkel des Hauptstrahls zur optischen Achse für drei verschiedene Wellenlängen und die Position des Hauptstrahls auf dem Sensor, beträgt der Winkel in der Bildmitte  $0^\circ$ : Hier stimmt der Hauptstrahl mit der optischen Achse überein (**Abb. 3**). In Richtung Bildecke beschreibt meist eine monotone Funktion den Hauptstrahlwinkel: je weiter von der Bildmitte weg, desto größer der Winkel. Im Beispiel erreicht der Winkel bei 5,5 mm – das entspricht einem



**Abb. 1** Die beiden Würfel befinden sich in leicht unterschiedlichem Abstand zur Kamera (a). Der Öffnungswinkel des Festbrennweiten-Objektivs sorgt dafür, dass der rechte Würfel kleiner abgebildet wird als der gleichgroße linke Würfel, der sich näher am Prüfsystem befindet (b). Nimmt ein telezentrisches Objektiv die gleiche Szene auf, erscheinen beide Würfel gleich (c).



**Abb. 2** Ein telezentrisches Objektiv hat einen Punkt, einmal im Fokus (a, oben), einmal mit leichtem Defokus (unten) aufgenommen. Der Effekt der Defokussierung verteilt sich symmetrisch, ohne dass sich die Lage des Schwerpunkts verändert. Der Verlauf der Grauskala (b) zeigt, dass sich im defokussierten Fall (blau) die Kante auf mehrere Pixel verteilt, was zu wiederholbareren Ergebnissen führen kann als im fokussierten Fall (grün).

Sensor mit 11 mm Diagonalen bzw. 2/3-Zoll-Format – einen Wert von etwa  $0,1^\circ$  für Licht der Wellenlänge 486 nm. Die Funktion muss aber nicht immer monoton sein und kann sich insbesondere für andere Wellenlängen unterscheiden. Für rotes Licht (656 nm) beträgt der Winkel bei 5,5 mm nur etwa  $0,015^\circ$  – und die Kurve weist einen Vorzeichenwechsel auf. Bei etwa 4,4 mm Bildhöhe beträgt der Winkel  $0^\circ$ .

**Vorteile bei optischen Filtern**

Auch bildseitig können telezentrische Objektive Vorteile bieten. Sie sind weniger sensitiv auf die genaue

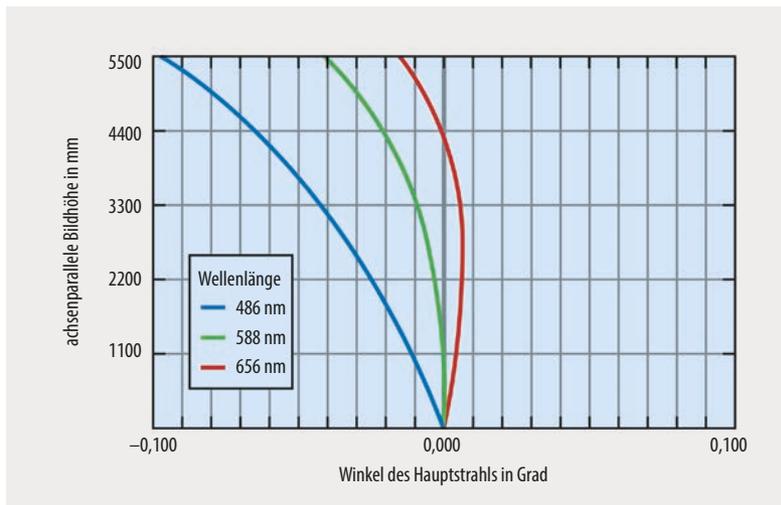
Position und Lage des Sensors in der Kamera. Zudem vermeiden sie den radiometrischen Effekt, den das  $\cos^4$ -Gesetz beschreibt: Die Intensität des Lichts nimmt von der Mitte weg zum Bildrand mit dem Faktor  $\cos^4(\text{CRA})$  ab, wobei CRA für den bildseitigen Winkel des Hauptstrahls steht (Chief Ray Angle).

Für ein telezentrisches Objektiv beträgt dieser Winkel  $0^\circ$ , der Faktor somit 1. Weist das Objektiv keine mechanische Vignettierung auf in Verbindung mit dem verwendeten Sensor, tritt kein Randlichtabfall auf.

Ein letzter Vorteil bildseitiger Telezentrie kommt zum Tragen, wenn zwischen Objektiv und Ka-

mera präzise optische Filter eingebaut sind. Diese sind meist für einen Einfallswinkel von  $0^\circ$  ausgelegt. Je größer die Abweichung von diesem Winkel, desto mehr verschiebt sich die Filterresponse zu kürzeren Wellenlängen. Daraus resultiert eine ungleichmäßige Filtertransmission über der Sensorfläche, was bei präzisen Messungen beispielsweise bei der Fluoreszenz oder im Hyperspectral Imaging in der Regel nicht tragbar ist.

Für die optische Messtechnik ist meist der erstgenannte Faktor entscheidend. Um bestmögliche Messergebnisse zu erzielen, empfiehlt es sich jedoch, doppelseitig telezentrische Objektive zu verwenden, welche die Vorteile beider Konzepte vereinen.



**Der Autor**

**Dr. Boris Lange**, Edmund Optics GmbH, Mainz, Tel.: +49 6131 570 00, sales@edmundoptics.de, www.edmundoptics.de

**Abb. 3** Das Beispiel eines 1X Objektivs zeigt, dass Bildhöhe und Telezentrie bei verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich voneinander abhängen.